

## An Experimental Study on Sediment Discharge in River Channel for the Reduction of Sediment Disaster

Kye Won Jun<sup>#</sup>, Mu Pyung Baek<sup>+</sup>, Jong Ho Choi<sup>+</sup>

Disaster Prevention, Kangwon National University Graduate School, 346 Joongang-ro, Samcheok-si, Korea

### Abstract

Due to recent climate change, the frequency of heavy rainfalls and sediment disasters is increasing. In order to prevent damages caused by sediment disaster and implement a comprehensive sediment control, a time-series analysis of sediment discharge data is essential. However, in South Korea, it is difficult to measure them directly as they use conventional meters as measurement, which prevents research from presenting a quantitative relationship between hydrological factors and mechanisms with regard to sediment transport. In this regard, the study attempted to overcome difficulties related to the measurement of soil particle transport in river channel. It used acoustic signals to recognize the transport of sediment particles and established an indoor waterway experiment equipment with a hydrophone. As a result, it is found that the minimum threshold value for the main collision of individual particles perceived by hydrophone increased as the supply flow rate and the size of sediment particles increased.

**Key words:** sediment disaster, sediment discharge, hydraulic model experiment, hydrophone, collision acoustic filtering

### 1. 서론

우리나라는 최근 집중호우의 발생빈도 증가에 따른 영향으로 산사태 및 토석류 등 산지재해에 의해 발생한 토사가 빠른 속도로 하천에 유입되어 홍수피해와 생태계 교란 등 각종 피해를 발생시키고 있다. 2011년 국가수문관측망 구축 보고서에 따르면 하도 내 토사유입으로 발생하는 피해를 최소화하기 위해서는 정기적인 토사 이동량 모니터링이 필요하나 현재 국내의 경우는 단

순한 가정이나 경험식에 의한 추정치들을 이용하는 실정이므로 실측자료를 생산할 수 있는 관측망 구축이 필요하다고 언급하고 있다(Ministry of Land, 2011). 위와 같이 토사재해로 인한 피해예방 및 종합적인 토사 관리를 위해서는 정량적이고 시계열적인 하도 내 토사 이동량 파악이 필수적이다.

유수에 의해 침식과 유송, 퇴적작용을 거쳐 산지하천 및 충적하천의 한 지점을 통과하는 토사이동량은 유역 종합치수계획 및 사방시설물 등의 적지선정을 위한 기

<sup>#</sup> The 1st author: Kye Won Jun, Tel. +82-33-570-6816, Fax. +82-33-570-6501, e-mail, kwjun@kangwon.ac.kr

<sup>+</sup> Corresponding authors: Mu Pyung Baek, Tel. +82-31-457-3277, e-mail, whitenam28@naver.com  
Jong Ho Choi, Tel. +82-33-570-6446, e-mail, apt105@kangwon.ac.kr

초자료로서 매우 중요한 자료이다. 이처럼 하천계획에 필요한 기본적 요소인 토사이동량을 측정하기 위한 가장 일반적인 방법으로는 Helly-Smith 또는 BTMA (Bedload Transport Meter Arnhem)와 같은 트랩 샘플러(traps samplers)와 등속성 샘플러(isokinetic samplers)를 이용한 직접적인 물리적 측정 방법이 이용되고 있다(Claude, *et. al.*, 2012). 위와 같은 방법은 자갈 및 모래 하상으로 이루어진 하천에서 광범위하게 이용되고 있다(Bunte, *et. al.*, 2004). 그러나 이러한 직접적인 측정방법은 실제 측정이 용이하지 않다. 또한 많은 인력과 경비가 소요되고 시간적인 토사이동량의 변화가 심할 경우 연속적인 데이터의 취득이 불가능하다(Park, 2015; Choi, 2016). 이에, 일본 및 유럽국가에서는 기존의 토사이동량 측정 방법의 문제점을 보완한 측정 기기의 개발 및 실용화를 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다(Oda, *et. al.*, 2008; Suzuki, *et. al.*, 2013; Koshiha, *et. al.*, 2016).

1986년 스위스의 산림자연연구소에서는 토사가 이동할 때 발생하는 진동을 관측기법에 적용하여 하도 내 토사이동량의 시계열적 변화를 관측할 수 있는 PBIS(Piezoelectric Bed Load Impact Sensor)를 개발하였다(Hegg, *et. al.*, 2006). 현재는 PBIS의 단점인 시스템 보정의 번거로움과 감지할 수 있는 토사 입자 크기의 한계 등을 보완한 지오폰(geophone)이 개발되어 유럽 국가를 중심으로 활용범위가 확대되고 있다(Rickenmann & Fritschi, 2010). 1992년 일본에서는 금속관에 토사가 충돌할 때 발생하는 음향신호에서 토사이동량을 간접적으로 추정하는 관측기기인 하이드로폰(hydrophone)이 개발되어 현지 및 적용실험에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kurihara & Miyamoto, 1992).

음향 및 진동의 원리를 이용한 하도 내 토사이동량의 간접적 추정에 관한 연구는 1990년대부터 실내수조실험 및 현장적용을 통해 활발히 이루어지고 있다. Shinichi & Yasumasa(1992)은 하이드로폰에 토사가

충돌할 경우에 발생하는 음향신호의 진폭은 토사의 질량과 속도의 곱(운동량)에 강한 상관성이 있다는 것과 특정 레벨 이상의 진폭을 가지는 신호 수(펄스)와 토사이동량의 상관성을 해명하였다. 위와 같은 연구를 바탕으로 Mizuyama, *et. al.*(1996)은 수위·유량 관측시설과 하이드로폰을 함께 설치하여 토사이동량을 연속적으로 관측하기 위한 모니터링 연구를 수행하였다. 2010년 일본 교토대학교 방재연구소는 토사이동량을 정량적으로 파악하기 위해 하이드로폰과 피트유사계(pit sampler)의 연계를 통한 음향파형의 강도와 토사이동량의 보정관계를 도출하였고(Tsutsumi, *et. al.*, 2010), 2011년 일본국토교통성은 현지 수로 실험을 실시하여 토사이동량의 산정, 토사 입경별 산출의 적용범위, 혼합입경의 입경분포추정을 위한 실험을 수행하였다(Hida, *et. al.*, 2011).

상기의 연구와 같이 대부분의 연구들은 하도 내 토사이동량을 산정하기 위해 하이드로폰에 토사가 충돌할 때 발생하는 음향특성 중 음향 펄스와 토사이동량의 상관성을 해명하는 연구가 주를 이루었다. 이러한 기존의 연구들은 펄스의 필터링을 위해, 하이드로폰에서 측정되는 음향데이터를 증폭기를 이용하여 여러 배율로 증폭시킨 뒤 진폭의 임계치를 초과한 펄스를 필터링하는 방법을 채택해 왔다. 그러나 이러한 방법은 다양한 입경을 가진 토사를 하나의 대표적인 임계치를 기준으로 나타내기 때문에 토사의 개별입자별 음향특성을 반영하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 산지재해 발생시 산지로부터 유입되는 하도 내 토사이동량 측정의 어려움을 개선하기 위한 실험적 연구로 하이드로폰을 적용한 실내수로 실험 장치를 구축하고 현장에서 취득한 시료 중 대표시료로 분류된 25.40mm, 19.05mm, 12.70mm, 9.53mm, 4.75mm의 5종류의 입자에 대한 충돌음향 계측 및 분석을 통해 하이드로폰의 인지특성 파악과 입자 크기별로 충돌음을 분리할 수 있는 임계치 범위 선정에 관한 연구를 수행하였다.

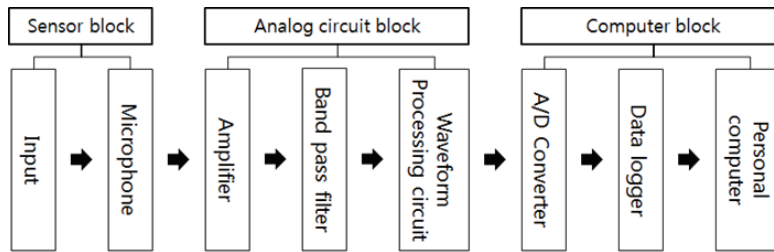


Figure 1. Configuration and operational flow diagram for the hydrophone system

## II. 기본이론

1. 하이드로폰을 이용한 토사이동량 추정의 원리  
토사이동량의 간접적 측정방법 중 하나로, 토사이동 시 충돌에 의한 음향정보를 계속하여 토사이동량을 연속적으로 측정 할 수 있는 하이드로폰을 활용하는 방법이 있다.

하이드로폰의 토사이동량 측정 시스템의 수행과정은 <Figure 1>과 같다. 하이드로폰의 시스템은 토사가 하상면에 설치된 금속관에 충돌했을 경우에 발생하는 충돌음을 음향신호로 감지하는 센서부와 음향신호를 아날로그 신호로 처리하는 아날로그 회로부, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환 후 토사이동량을 추정하는 컴퓨터 처리부로 구성된다(Jun, *et. al.*, 2015).

아날로그 회로부는 미약한 음향신호를 증폭시키는

증폭기(amplifier), 불필요한 신호를 제거하여 특정 주파수만을 통과시키는 대역통과필터(band pass filter), 일정하게 설정된 진폭의 임계치(threshold value)를 기준으로 관측에 유효한 신호만을 검출하는 파형처리 회로(waveform processing circuit)로 구성된다. 컴퓨터 처리부는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D변환기, 음향의 세기 및 충돌 횟수를 기록하는 데이터로거, 기록된 데이터를 바탕으로 음향특성과 토사이동량과의 관계를 분석하여 토사이동량을 추정하는 컴퓨터로 구성된다.

2. 음향신호의 필터링 및 토사이동량 추정 방법  
하이드로폰에서 측정되는 음향신호에 대해서 진폭의 임계치를 설정하고 이산화하여 펄스(충돌 횟수)를 필터링 하는 방법으로는 두 가지 방법이 있다. <Figure 2>의

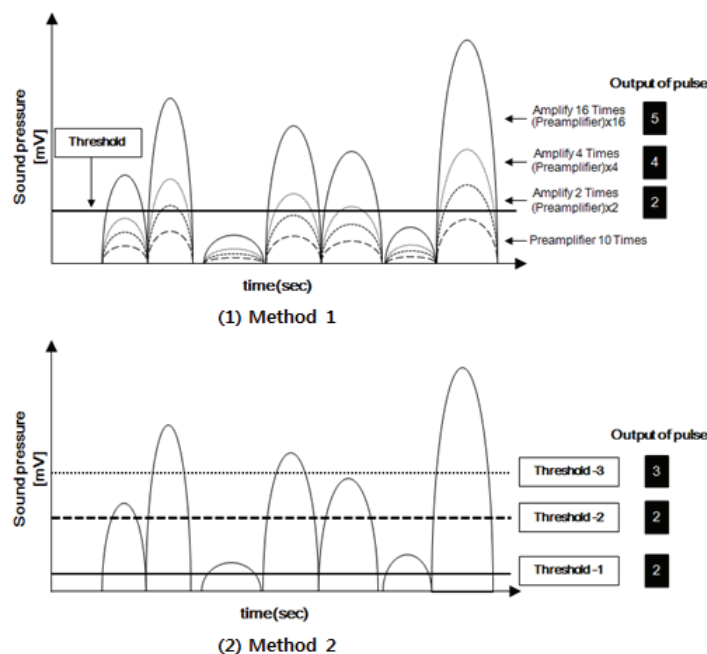


Figure 2. Filtering method of the acoustic signals

상단의 그림과 같이 음향신호를 여러 단계로 신호를 증폭시켜 각 신호가 하나의 임계치를 초과한 펄스를 필터링하는 방법(Method 1)이다(Mizuyama, *et. al.*, 1998; Oda, *et. al.*, 2004; Nakaya, 2008). Method 1의 방법에 의해 검출되는 펄스는 하나의 임계치를 기준으로 음향신호를 2배로 증폭 시켰을 경우 2회, 4배로 증폭 시켰을 경우 4회, 16배로 증폭 시켰을 경우 5회가 검출된다. 다른 하나의 방법은 <Figure 2>의 하단의 그림과 같이 신호를 증폭시키지 않고 임계치를 여러 단계로 구성하여 하나의 신호가 각각의 임계치를 초과한 펄스를 필터링하는 방법(Method 2)이다(Hasegawa & Miyamoto, 2014). Method 2의 방법에 의해 검출되는 펄스는 여러 단계로 설정된 임계치를 기준으로 임계치1에서는 2회, 임계치2에서는 2회, 임계치3에서는 3회가 검출 된다.

위와 같은 필터링 방법에 의해 구해진 펄스로부터 토사 이동량을 추정하기 위한 방법은 다음과 같다. Method 1의 방법은 다양한 입경을 가진 토사의 포착률(펄스/입자 수)을 고려하기 위하여 여러 배율로 증폭한 신호에서 각각의 토사입경의 포착률을 가장 양호하게 대변하는 특정 증폭신호를 선정하여 토사 이동량을 추정하는 방법이다. Method 2의 방법은 음향신호에 대한 진폭의 임계치를 여러 단계로 구분하여 다양한 입경을 가진 토사의 음향신호에 대해 각각의 임계치의 구분마다 필터링 되는 펄스로부터 토사 이동량을 추정하는 방법이다.

현재 현지에서 운용되고 있는 하이드로폰 시스템의 대부분은 Method 1을 사용하고 있다. 그러나, Method 1에 의한 방법은 다양한 입경을 가진 토사를 하나의 대표적인 임계치를 기준으로 나타내기 때문에 토사의 개별입자별 음향특성을 반영하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 하이드로폰을 적용한 수리모형실험을 이용하여 개별입자별 충돌음향에 대한 특성을 분석하고 Method 2의 방법과 유사하게 입자 크기별로 충돌음을 분리할 수 있는 임계치 범위를 분류하기 위한 연구

를 수행하였다.

### III. 실험장치의 구성 및 방법

#### 1. 실험장치

하이드로폰을 설치하여 실내 실험을 실시한 국내사례가 없어 국외사례를 참고하여 실험장치를 구성하고 실험을 실시하였다. 구성된 실험 장치의 전경 및 외관도를 <Figure 3>, <Figure 4>에 도시하였다. 실험수로는 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 10m인 구형단면의 가변식 개수로 실험 장치를 이용하였다. 개수로 실험장치의 흐름은 급수 펌프(supply pump)에 의해 저수조(storage reservoir)의 물을 고수조로 양수하고 삼각위어(triangular weir)를 유하하여 파쇄장치(lattice screen)로 흐르게 함으로써 최대 안정화된 물이 개수로를 유하하도록 하였다. 유량의 공급은 유량조절 밸브를 조작하여 조절하였다.

토사 입자의 충돌음을 측정하기 위한 하이드로폰은 수로 하단부의 시료 입자의 흐름안정구간에 설치하였다. 하이드로폰의 제원은 길이 33.6cm, 외경 25mm, 내경 20mm의 원형단면인 금속관을 주요 구성요소로 하는 스테인리스 박스구조로 되어 있다. 하이드로폰에 의해 측정되는 음향데이터는 분당 25,600개의 샘플링 속도로 데이터로거로 수집되도록 설정하였다.

토사 입자의 음향특성을 정량화하기 위한 관측 장비로는 수위 측정을 위한 포인트 수위계(point gauge)와 토사 입자의 이동형상을 관측하기 위한 2대의 비디오카메라가 있다. 포인트 수위계는 하이드로폰의 직상류 구간에 설치하여 중앙 수위를 측정하였고, 비디오카메라는 하이드로폰의 측면 및 상단에 설치하여 이동형상을 관측하였다. 유속의 측정은 유속계와 같은 측정 장비를 이용할 경우 유수의 흐름 방해로 인한 오차가 크게 발생할 것으로 예상되어 단면평균유속을 계산하여 사용하였다.

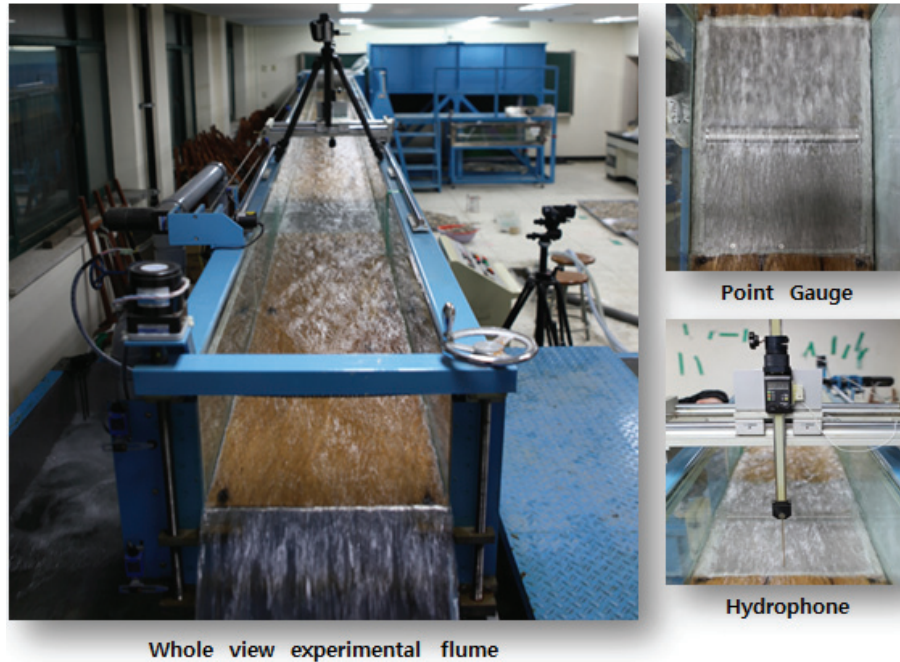


Figure 3. Hydraulic model experiment equipment

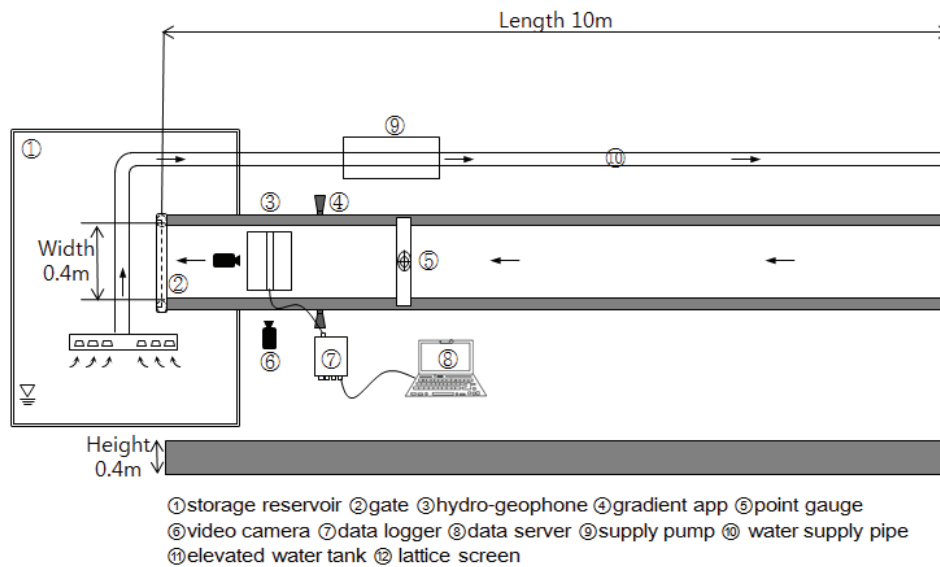


Figure 4. Appearance drawing of hydraulic model experiment equipment

## 2. 실험방법

개별입자의 토사이동에 대한 음향특성 파악 및 임계치 범위선정을 위해 <Table 1>과 같이 수로의 경사를 1/30로 고정시키고 2가지 유량조건에서의 실험을 수행하였고, <Figure 5>, <Figure 6>과 같이 선행실험에서 하이드로폰으로 측정되는 충돌음이 front, main, tail 세부분의 충돌음으로 구분되는 현상이 확인되어 각 부분에서 측정

되는 충돌음을 특정지어 구분하기 위해 main 충돌음을 기준으로 충돌이격 시간과 충돌음의 상대적 세기를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 실험재료는 4.75mm, 9.53mm, 12.70mm, 19.05mm, 25.40mm의 5종류의 토사를 이용하였으며, 토사의 공급은 개별입자별로 총 20개의 토사를 하나씩 수로상단에서 반복적으로 공급하여 수로하단의 하이드로폰에 충돌시켰다.

Table 1. Experimental case

No.	Sample $\ell$ /sec	Discharge ( $m^3$ /sec)	Velocity (m/sec)	Water level (cm)	Slope
1	4.75mm	30.91	1.76	4.38	1/30
2	9.53mm				
3	12.70mm				
4	19.05mm				
5	25.40mm				
6	4.75mm	14.30	1.42	2.52	
7	9.53mm				
8	12.70mm				
9	19.05mm				
10	25.40mm				

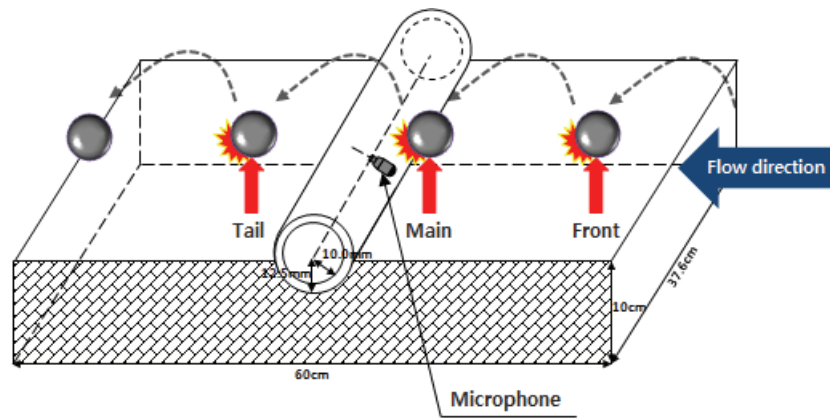


Figure 5. Collision position of longitudinal section for hydrophone

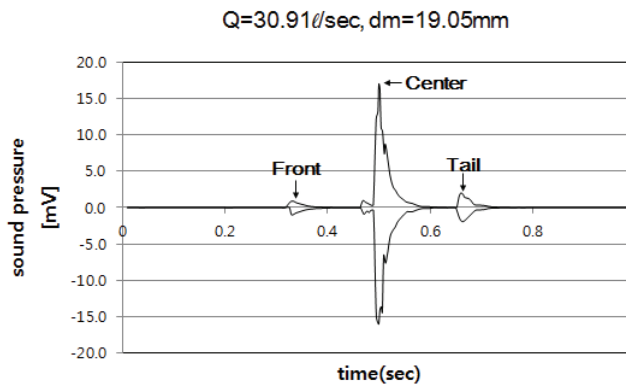


Figure 6. Acoustic signal measured in longitudinal section

#### IV. 결과분석

##### 1. 하이드로폰 음향신호 인지특성

개별입자별로 하이드로폰의 종단면 충돌위치에 따라 front, main, tail로 구분하였다. 개별입자별 충돌음향

의 특성치는 1초 내로 모두 계측되기 때문에 0.5초를 기준으로 front충돌, main충돌, tail충돌로 구분하여 각 충돌위치에서의 평균 음압과 충돌시간, 변동계수를 분석하였다. 유량 2단계의 변화에 따른 개별입자별 충돌음향 특성에 대한 분석결과를 (Figure 7)~(Figure 8),

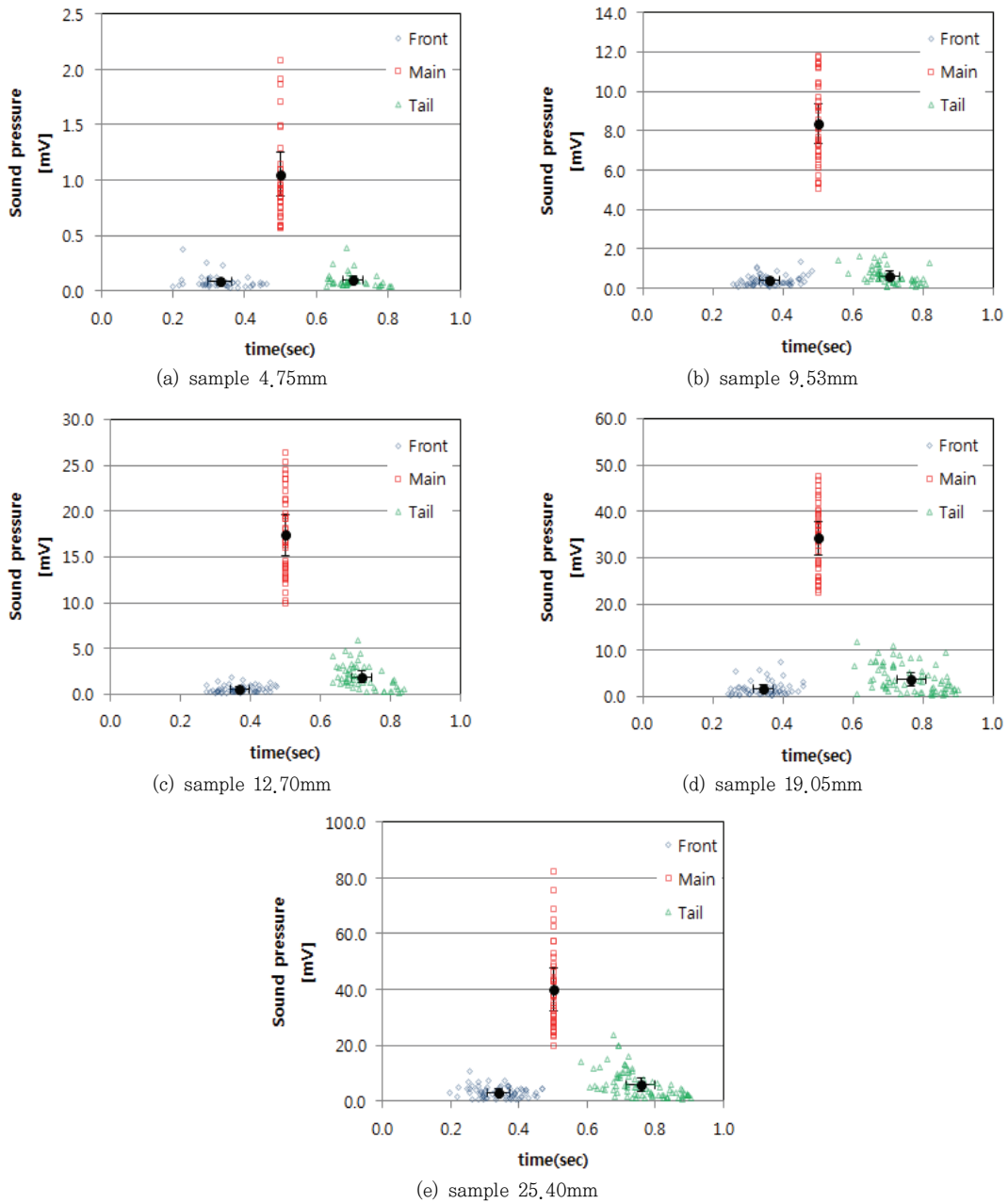


Figure 7. Acoustic characteristics by collision position of longitudinal section(14.30ℓ /sec)

〈Table 2〉~〈Table 3〉에 나타내었다.

유량 변화에 따른 main 충돌시의 평균 음압과 데이터의 편차를 25.40mm, 19.05mm, 12.70mm, 9.53mm, 4.75mm의 토사 입자크기 순서로 분석하였다. 분석 결과, main 충돌시의 충돌위치에서 동일하게 시료 입자의 크기가 커질수록 하이드로폰이 인지하는 음압은 커지는 것으로 분석되었으며 유량의 증가에 따라 평균음압은 최소 1.31배에서 최대 1.56배 이상 증가하는 것으로

분석되었다.

〈Table 4〉는 하이드로폰의 각 종단면 충돌위치에서의 충돌음향 특성치를 main 충돌음을 기준으로 충돌이 격 시간과 충돌음의 상대적 세기를 분석한 것이다. main 충돌음을 기준으로 front 충돌과 tail 충돌은 각각 평균 0.13초 전, 0.22초 후에 충돌하는 것으로 나타났다. 충돌음의 상대적 세기는 main 충돌과 대비하였을 때 front 충돌은 4.82%, tail 충돌은 10.41%인 것으로 분

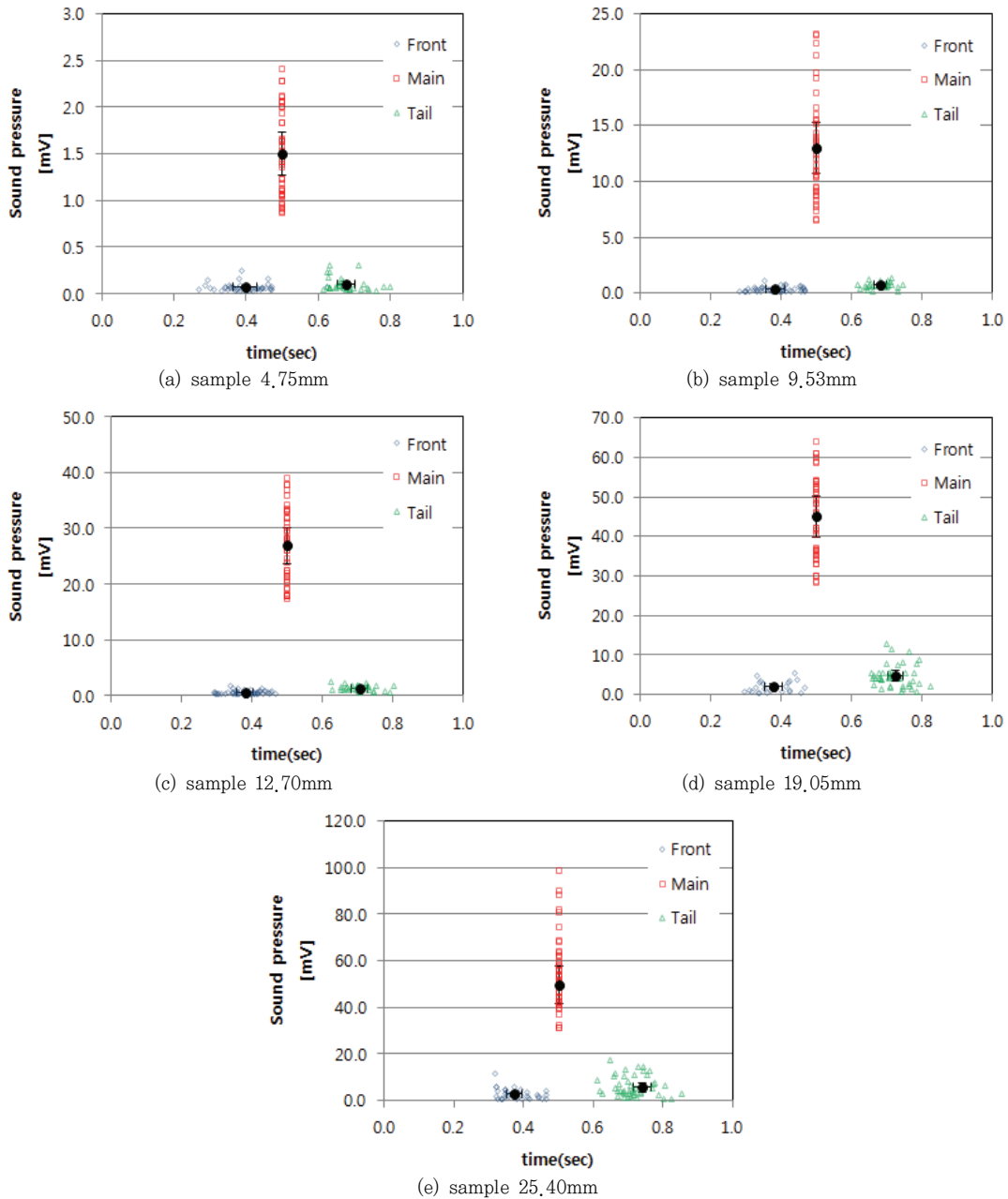


Figure 8. Acoustic characteristics by collision position of longitudinal section(30.91ℓ /sec)

석되었다. 여기서, tail 충돌이 front 충돌에 비해 충돌음의 상대적 세기가 크게 나타난 것은 하이드로폰의 영향에 의해 front와 tail 부분의 수위 차에 의한 영향으로 충돌음압이 크게 나타난 것으로 판단된다.

하이드로폰으로 수집되는 음향데이터는 <Figure 7>, <Figure 8>과 같이 각 충돌위치의 음향특성에 대한 평균값을 중심으로 상하 및 좌우로 분산된 형태를 나타내는 산포형 데이터로 나타난다. 이처럼 데이터에 편차

가 나타나는 이유는 시료 입자의 형상, 충돌 속도 및 접촉 면적 등에 의한 것으로 생각되며 종단면 충돌위치별 음압에 대한 산포도의 정도를 비교하기 위해 변동계수를 산정하였다. 변동계수 산정결과 유량 두 종류에 따른 main 충돌시의 변동계수는 30.00% 이내로 데이터가 평균에 대체적으로 밀집된 것으로 나타났지만 front 충돌은 평균 65.72%, tail 충돌은 65.39%로 데이터의 산포도가 큰 것으로 나타났다.



Table 2. Acoustic characteristics by collision position of longitudinal section(Q=14.30ℓ /sec)

Sample (mm)	Front		Main		Tail	
	Sp(mV)	time(sec)	Sp(mV)	time(sec)	Sp(mV)	time(sec)
4.75	0.08(±0.03)	0.33(±0.03)	1.05(±0.20)	0.5	0.09(±0.03)	0.70(±0.03)
9.53	0.39(±0.13)	0.36(±0.03)	8.36(±1.00)	0.5	0.65(±0.21)	0.70(±0.03)
12.70	0.63(±0.19)	0.37(±0.05)	17.42(±2.23)	0.5	1.93(±0.66)	0.72(±0.06)
19.05	1.76(±0.76)	0.34(±0.03)	34.21(±3.60)	0.5	3.86(±1.49)	0.77(±0.04)
25.40	3.19(±1.02)	0.34(±0.03)	40.07(±7.70)	0.5	5.87(±2.43)	0.76(±0.04)
CV(%)	70.46	-	29.42	-	71.93	-

Table 3. Acoustic characteristics by collision position of longitudinal section(Q=30.91ℓ /sec)

Sample (mm)	Front		Main		Tail	
	Sp(mV)	time(sec)	Sp(mV)	time(sec)	Sp(mV)	time(sec)
4.75	0.07(±0.01)	0.40(±0.03)	1.50(±0.23)	0.5	0.10(±0.04)	0.68(±0.02)
9.53	0.32(±0.10)	0.38(±0.03)	13.02(±2.30)	0.5	0.69(±0.15)	0.68(±0.02)
12.70	0.55(±0.16)	0.38(±0.02)	26.83(±3.31)	0.5	1.33(±0.26)	0.71(±0.02)
19.05	1.96(±0.72)	0.38(±0.03)	44.97(±5.21)	0.5	4.69(±1.43)	0.73(±0.02)
25.40	2.75(±1.13)	0.38(±0.02)	55.24(±8.18)	0.5	6.06(±2.14)	0.72(±0.03)
CV(%)	60.98	-	28.69	-	58.84	-

Table 4. collision time and acoustic energy rate for main collision

	Front	Main	Tail
Time (sec)	-0.13	0.50	+0.22
Sound pressure rate (%)	4.82	100.00	10.41

2. 토사입자 크기별 음향신호 역치범위 분류

개별입자별로 토사이동에 대한 실험을 반복수행하여 <Figure 9>와 <Table 5>와 같이 유량변화에 따른 개별입자별 임계치 범위를 분류하였다. 임계치 범위는 main 충돌시의 음압 크기를 기준으로 분류하였다. <Table 5>에서  $Q_s$ 가 뜻하는 것은 개별입자별 임계치 범위 안의 값들을 뜻한다. 유량 14.27ℓ/sec일 경우의 개별입자별 임계치범위는 다음과 같다. 4.75mm의 경우 1.05mV 초과 8.36mV 이하의 범위, 9.53mm의 경우 8.36mV 초과 17.42mV 이하, 12.70mm의 경우 17.42mV 초과 34.21mV 이하, 19.05mm의 경우 34.21mV 초과 40.07mV 이하, 25.40mm가 인지할 수 있는 임계치범위는 40.07mV를 초과 했을 때로 분류되었다.

유량 증가에 따른 개별입자별 임계치 범위를 분석한

결과는 다음과 같다. 유량 14.27ℓ/sec에서 30.91ℓ/sec로 변화시켰을 경우 <Figure 9>에서와 같이 개별입자에 대한 최소 임계치 기준이 증가하는 것으로 분석되었고 토사 입자의 크기가 커질수록 인지할 수 있는 임계치 범위 또한 증가하는 경향으로 나타났다 (<Table 5>).

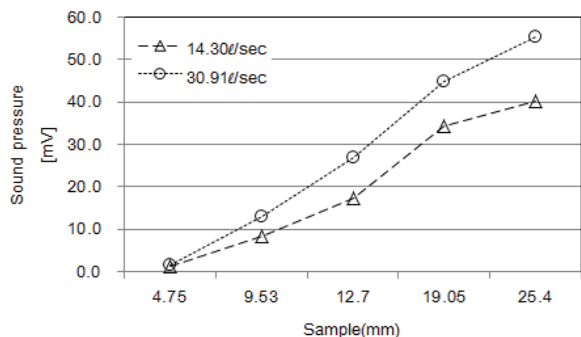


Figure 9. Threshold range classification in accordance with the sample particle size and discharge

Table 5. Threshold range classification in accordance with the sample size and discharge

case	Sound pressure[mV]			
	$Q=14.27\ell/\text{sec}$		$Q=30.91\ell/\text{sec}$	
4.75mm	1.05	$\leq Q_s \leq$	8.36	1.50 $\leq Q_s \leq$ 13.02
9.53mm	8.36	$< Q_s \leq$	17.42	13.02 $< Q_s \leq$ 26.83
12.70mm	17.42	$< Q_s \leq$	34.21	26.83 $< Q_s \leq$ 44.97
19.05mm	34.21	$< Q_s \leq$	40.07	44.97 $< Q_s \leq$ 55.24
25.40mm	40.07	$< Q_s$		55.24 $< Q_s$

## V. 결론

하이드로폰을 적용한 수리모형실험을 이용하여 하도 내 토사입자 크기별로 충돌음향을 분리할 수 있는 임계치범위 산정에 관한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국내의 선행연구들을 분석한 결과 하이드로폰을 이용한 토사이동량 측정방법은 기존 단순 측정 기술에서 벗어나 토사이동량에 대한 연속측정이 가능하기 때문에 기초 수문데이터의 양적 및 질적 확보가 가능한 것으로 나타났다. 또한 토사유출로 야기되는 방재·환경상의 문제를 해결하기 위해 하이드로폰을 이용한 토사이동량 측정 방법이 개발·검토되고 있음을 확인하였다.

2) 하이드로폰의 인지특성 파악을 위해 토사입자의 이동에 따른 충돌음향을 계측 분석한 결과, 하이드로폰의 종단면 충돌위치에 따라 front, main, tail의 세부분의 음향신호로 구분되는 현상이 확인되었다. front 및 tail 위치에서의 음향신호에 비해 상대적으로 main 위치에서의 음향신호의 인지력이 높은 것으로 나타났고, main 충돌시의 음향신호를 기준으로 각 충돌위치에서 측정되는 음향신호를 특정지어 구분할 수 있었다.

3) 하이드로폰을 통해 수집되는 음향신호를 main 충돌 음을 기준으로 개별입자별 임계치 범위를 분류한 결과, 유량의 증가에 따라 하이드로폰이 인지하는 최소 임계치 기준이 최소 1.31배에서 최대 1.56배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 또한 토사 입자의 크기(4.75mm, 9.53mm, 12.70mm, 19.05mm, 25.40mm)가 커질수록 인지할 수 있는 임계치 범위 또한 증가하는 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 다양한 토사 입자 크기에 대

한 충돌음향의 인지범위가 구분되었음을 의미한다.

향후 토사입자 크기별로 토사이동량을 연속적으로 모니터링 할 수 있는 방법을 확립하여 합리적인 하천관리계획 및 사방계획 수립이 가능하도록 연구를 지속적으로 수행할 것이다. 현재 본 연구의 실험조건 및 범위는 기초적이고 제한적이지만 추가·보완 실험을 실시하여 다양한 수리조건 및 토사입자 크기를 고려한 토사이동량 산정 관계식 도출 및 하이드로폰의 각 종단면 충돌위치에서의 음향신호 특성을 고려한 필터링 작업을 수행할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업으로 이에 감사드립니다(NRF-2016R1D1A3B03933362).

이 논문은 행정안전부장관의 방재안전분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

## References

- Bunte, K., S. R. Abt, J. P. Potyondy, and S. E. Ryan. 2004. Measurement of Coarse Gravel and Cobble Transport Using Portable Bedload Traps. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(9): 879-893.
- Choi, Jong Ho. 2016. An Experimental Study on Filtering Acoustic Signals of Different Bedload Particles Using the Hydrophone. Master's Thesis. Kangwon National University.
- Claude, N., S. Rodrigues, V. Bustillo, J. G. Br  h  ret, J. J. Macaire, and P. Jug  . 2012. Estimating Bedload Transport in a Large

- Sand-Gravel Bed River from Direct Sampling. Dune Tracking and Empirical Formulas. *Geomorphology*. 179: 40-57.
- Hasegawa, Y. and K. Miyamoto. 2014. Experimental Study Natural Resonance Modes of Sound of a Hydrophone and Sediment Discharge Measurement. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 66(5): 23-32.
- Hegg, C., B. W. McArdeil, and A. Badoux. 2006. One Hundred Years of Mountain Hydrology in Switzerland by the WSL. *Hydrological Processes*. 20(2): 371-376.
- Hida, Y., Y. Ogawa, N. Kurokawa, and A. Matsuda. 2011. Local Experiments on the Bed Load Measurements by Hydrophone. *Annual Conference of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 4-25.
- Jun, Kye Won, Young Ho Youn, and Jong Ho Choi. 2015. An Experimental Study on the Bedload Measurement Using Hydrophone. *Korean Review of Crisis and Emergency Management*. 11(12): 215-224.
- Koshiba, T., T. Sumi, and D. Tsutsumi. 2016. Study on Bedload Measurement by Plate-Type Vibration Sensor. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. 72(4): 925-930.
- Kurihara, K. and K. Miyamoto. 1992. Equipment for Sediment Discharge with Acoustic Sensor. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 44(5): 26-31.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. 2011. *Construction of National Hydrological Observation Network 2nd Year Study*. Sejong: MOLIT.
- Mizuyama, T., Y. Tomita, M. Nonaka, and M. Fujita. 1998. Observation of Sediment Discharge Using a Hydrophone. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 50(6): 44-47.
- Mizuyama, T., Y. Tomita, M. Nonaka, and M. Fujita. 1996. Observation of Sediment Discharge Rate Using a Hydrophone. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 49(4): 34-37.
- Nakaya, H. 2008. A Case Study of Influences on the Bed Load Detection Rate of Hydrophone System Exerted by Flow Discharges. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 61(4): 12-20.
- Oda, A., T. Mizuyama, J. B. Laronne, M. Nonaka, and M. Matsuoka. 2008. Flume Experiments to Examine Hydrophone Characteristics. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 60(5): 66-71.
- Oda, A., Y. Hasegawa, T. Mizuyama, M. Nonaka, and K. Miyamoto. 2004. Measurement of Bed load Using Hydrophones in Hydraulic Model Experiments. *Proceedings of Hydraulic Engineering*. (48): 745-750.
- Park, Gi Yeong. 2015. An Analysis of Bed Load Discharge from Hydrophone in a Landslide Area. Master's Thesis. Yeungnam University.
- Rickenmann, D. and B. Fritschi. 2010. Bedload Transport Measurements Using Piezoelectric Impact Sensors and Geophones. *Proceedings of International Bedload-Surrogate Monitoring Workshop 2010*.
- Shinichi, T. and I. Yasumasa. 1992. The Signal Analysis of an Acoustic Sensor for Sediment Discharge Measurement. *The Hikone Ronso*. (276): 323-346.
- Suzuki, T., T. Uchida, A. Okamoto, K. Takahashi, S. Yamashita, Y. Kosuge, and A. Fukumoto. 2013. Applicability of Bedload Observation Method Using Sound Pressure Data Obtained by a Hydrophone. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 66(1): 4-14.
- Tsutsumi, D., R. Hirasawa, T. Mizuyama, M. Shida, and M. Fujita. 2010. Bed Load Observation in a Mountainous Watershed by Hydrophone Equipments. *Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University Annuals*. B(53): 537-544.
- Korean References Translated from the English*
- 국토교통부. 2011. 국가 수문망관측망 구축 2차년도 연구. 세종: 국토교통부.
- 박기영. 2015. Hydrophone을 이용한 산사태발생산지의 소류사 유출특성 분석. 영남대학교 석사학위논문.
- 전계원, 윤영호, 최종호. 2015. Hydrophone을 이용한 소류사 계측에 관한 실험적연구. 한국위기관리논집. 11(12): 215-224.
- 최종호. 2016. 하이드로폰을 이용한 소류사 입자별 음향신호 필터링을 위한 실험적 연구. 강원대학교 석사학위논문.

## 토사재해 저감을 위한 하도 내 토사이동량 분석에 관한 실험적 연구

국문초록 최근 기후변화의 영향으로 집중호우 및 토사재해 발생빈도가 증가하고 있다. 이러한 토사재해로 인한 하도 내 피해예방 및 종합적인 토사 관리를 위해서는 정량적이고 시계열적인 토사이동량 파악이 필수적이다. 그러나 우리나라의 재래식관측기를 이용한 직접적인 측정방법은 실제 측정이 용이하지 않고 많은 비용과 인력, 시간이 소요된다. 특히 연속적인 측정이 거의 불가능한 상태에 있어 토사 이송에 관한 수문학적 요인과 메커니즘 관계를 정량적으로 분석한 연구는 부족한 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 하도 내 토사이동량 측정의 어려움을 개선하기 위해 실내수로실험에 하이드로폰을 활용하였고 하이드로폰의 인지능력을 파악하기 위해 충돌음향 계측 및 분석을 수행하였다. 연구결과 하이드로폰이 인지할 수 있는 개별입자별 main충돌시의 최소 임계치 기준은 공급유량과 토사입자의 크기가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

주제어 : 토사재해, 토사이동량, 수리모형실험, 하이드로폰, 충돌음향 필터링

- 
- Profiles **Kye Won Jun** : He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 2004. He is a professor of the Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, in which he has taught since 2004. His interesting subject and area of research and education are flood prevention, mountainous disaster prevention, and natural disaster prevention & management. He has published 76 articles in journals and written 8 books (including co-author books)(kwjun@kangwon.ac.kr).
- Mu Pyung Baek** : He received his Master of engineering from Chungbuk National University, Korea in 2002. He is a Ph.D. course of the Department of Disaster Prevention & Management at Kangwon National University. His interesting subject of research is water resource design and flood damage(whitenam28@naver.com).
- Jong Ho Choi** : He received his Master of engineering from Kangwon National University, Korea in 2016. He is a Ph.D. course of the Department of Disaster Prevention & Management at Kangwon National University. His interesting subject of research is hydraulic- hydrologic modeling, sediment transportation, mountainous disaster(apt105@kangwon.ac.kr).